



SECADOR DE BANDEJAS MULTIESTÁGIO PARA PROCESSAMENTO DE FOLHAS MEDICINAIS: ESTUDO DE CASO PARA A SECAGEM DE RAMOS DE BARBATIMÃO (*Stryphnodendron adstringens*)

AMANDA C. GARDENAL^{1*}, MARIA DO CARMO FERREIRA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Departamento de Engenharia Química
*e-mail: amandagardenal@gmail.com

RESUMO - O extrato da folha de barbatimão é um ingrediente promissor para o desenvolvimento de medicamentos destinados ao tratamento do câncer de mama. Para conservar as propriedades da folha visando o processamento e extração, é recomendada a redução de umidade das mesmas. Objetivou-se desenvolver um secador de bandejas multiestágios para operar na configuração de bateladas em série, de modo a promover a mistura de material e melhorar o aproveitamento da energia térmica do ar na secagem de folhas medicinais. O secador operou com 4 estágios separados por uma distância de 11,88 cm e ar de secagem a 60°C e 0,4 m/s. Utilizando o modelo de Page, estimou-se o tempo de residência de 9,5 minutos para cada estágio, totalizando 38 minutos para a secagem de 100 g de ramos de barbatimão até a umidade de 10% (b.u.). Os dados experimentais foram condizentes com a curva de secagem teórica e o produto obtido apresentou umidade final uniforme e na faixa especificada para armazenamento. O aumento da eficiência energética cumulativa de secagem na operação em quatro estágios em relação à operação com um estágio foi de 25,6%. Portanto, o secador proposto atendeu os objetivos, sendo uma opção atrativa para a secagem de folhas medicinais.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o país de maior biodiversidade do planeta, sendo o Cerrado o segundo maior bioma brasileiro em extensão (BRASIL, 2002). O barbatimão (*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville) é uma planta do Cerrado cuja casca da árvore é usada há anos na medicina popular (FERREIRA *et al.*, 2013). Em estudos recentes, o potencial fitoterápico da folha desta espécie foi avaliado, sendo constatado em seu extrato atividade antioxidante, antimicrobiana e citotóxica contra duas linhas de células do câncer de mama humano. Isto indica o potencial do extrato da folha de barbatimão como agente quimiopreventivo e como um candidato promissor para o desenvolvimento de uma droga antineoplásica para o câncer de mama (SABINO *et al.*, 2018), além de ser uma

alternativa sustentável para o tratamento contra a bactéria *S. aureus* (FERREIRA *et al.*, 2013).

Após a colheita, as folhas iniciam um processo irreversível de degradação, sendo necessário realizar secagem das mesmas para que conservem suas propriedades até o processamento, garantindo maior tempo de prateleira, além de diminuir o volume e peso das mesmas, facilitando e barateando seu transporte. Porém, a secagem deste material oferece vários desafios devido à variabilidade inerente da forma e tamanho das folhas, baixa massa específica, elevadas áreas superficiais e alta capacidade de deformação e encolhimento. Tais características não favorecem um bom contato com o ar e, dependendo da configuração de secagem utilizada, podem resultar em produtos secos de maneira não uniforme e com umidade heterogênea. Portanto, faz-se necessário o

estudo de diferentes métodos e condições de secagens para diferentes espécies, visando à produção de extratos de melhor qualidade.

Os secadores de leito fixo apresentam configurações bastante simples e, por isso, têm baixo custo de implementação e são de fácil operação. Nesse tipo de secador, o ar aquecido percola um leito estático de partículas, trocando calor por convecção e removendo parte da umidade. Segundo Prado (2004), os estudos de secagem em leito fixo são muito importantes porque constituem a base para a compreensão dos fenômenos fundamentais que permeiam os estudos em outros leitos particulados. Porém, utilizando-se essa configuração de secagem, há a possibilidade de formação de canais preferenciais e grandes gradientes de temperatura e umidade ao longo do leito, contribuindo para uma secagem heterogênea. Em geral, a secagem de folhas em configurações de leito fixo requer que o material seja misturado ao longo do processo, para reduzir os gradientes de umidade.

Objetivou-se, com o presente estudo, desenvolver um secador de bandejas com múltiplos estágios para operar na configuração de leito fixo e regime de bateladas em série, de modo a promover a mistura de material e melhorar o aproveitamento da energia térmica do ar para a secagem de folhas medicinais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização do material

Foram utilizados galhos de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) coletados no Cerrado da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Considerando a praticidade do ponto de vista operacional, optou-se por trabalhar com ramos de barbatimão, que são constituídos por folhas presas a uma haste central. Foram selecionados ramos saudáveis e a determinação da umidade (em base úmida) dos ramos *in natura* foi feita pelo método gravimétrico, após secagem de cerca de 10 g de ramos em estufa a vácuo TE-395 da Tecnal (-660 mmHg) a 60°C por uma semana. As frações mássicas de folhas e hastes foram calculadas em relação à massa total dos ramos de barbatimão. Os experimentos foram realizados com auxílio de uma balança semi-analítica Ohaus AR3130 de precisão 0,001 g

conectada a um estabilizador de corrente EVS Line da TS Shara.

Secagem em camada espessa

Foram efetuados testes de secagem em camada espessa utilizando 400 g de ramos de barbatimão *in natura* acomodados em uma coluna construída de material aramado com mesma área de secagem de uma bandeja do secador proposto, que foi inserida na estrutura do mesmo. O ar de secagem apresentava temperatura de 60°C e velocidade de 0,4 m/s. Para avaliação da homogeneidade do material seco, o leito espesso foi dividido em quatro camadas (Figura 1), cada uma com aproximadamente 100 g de material *in natura*.

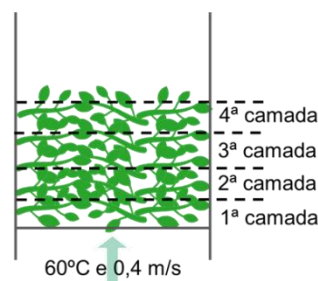


Figura 1: Camadas do leito espesso para avaliação da homogeneidade do material seco.

A umidade de cada uma dessas camadas foi obtida para os tempos de secagem de 10, 20 e 30 minutos, com auxílio de uma balança semi-analítica Ohaus AR3130 de precisão 0,001g conectada a um estabilizador de corrente EVS Line da TS Shara e estufa a 105°C para obtenção da umidade final.

Desenvolvimento do secador de bandejas

O secador de bandejas com múltiplos estágios desenvolvido para a secagem de folhas medicinais e condimentares foi construído na Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O secador foi confeccionado com chapas de ferro, possui uma câmara de secagem vertical com 97 cm de altura, 39,3 cm de largura e 30,5 cm de profundidade e sete fendas distribuídas verticalmente para o posicionamento de bandejas removíveis. A distância de separação entre as fendas é de 11,88 cm, e pode ser modificada posicionando-se bandejas em diferentes alturas de acordo com a configuração desejada para a secagem.

Cada bandeja é seccionada em três partes, sendo que cada parte possui um eixo central, possibilitando a sua rotação para descarregar o produto nas bandejas inferiores sem interferência externa. As bandejas foram confeccionadas com chapas de metal perfurado, de forma a permitir o escoamento do ar, e possuem dimensões de 30 cm de profundidade e 12,8 cm de largura. As três seções combinadas ocupam toda a área da seção transversal ao escoamento. Uma representação do secador desenvolvido e de uma das seções de bandeja, juntamente com suas cotas, está ilustrada na Figura 2.

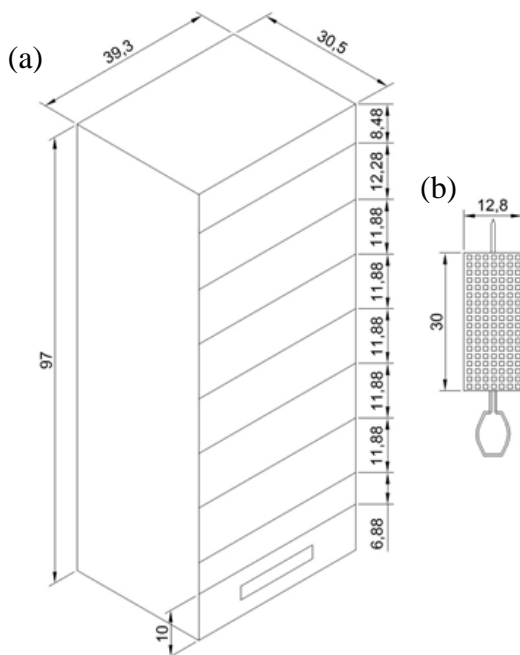


Figura 2: Cotas em centímetros: (a) secador de bandejas desenvolvido e (b) seção de uma bandeja.

Por questões operacionais, o número de estágios em operação simultânea foi limitado a quatro. Na base do secador foi instalada uma gaveta de chapa perfurada com 10 cm de altura para a coleta do material seco. Para fins de notação, os estágios foram enumerados a partir da base até o topo.

A unidade experimental, cujo esquema é indicado na Figura 3, é composta por um soprador de capacidade máxima de 8,2 m³/min da marca Elam, manômetro de mercúrio, placa de duplo orifício, caixa com três resistências, controlador de temperatura da Flyever (modelo FE50RPN), Arduino UNO e sensor DHT22, uma chave seletora de termopares

com dez canais, leitor de temperatura digi-sense da Cole Parmer e 7 termopares encapsulados do tipo T. Também foi utilizada uma balança semi-analítica Ohaus AR3130 de precisão 0,001g conectada a um estabilizador de corrente EVS Line da TS Shara.

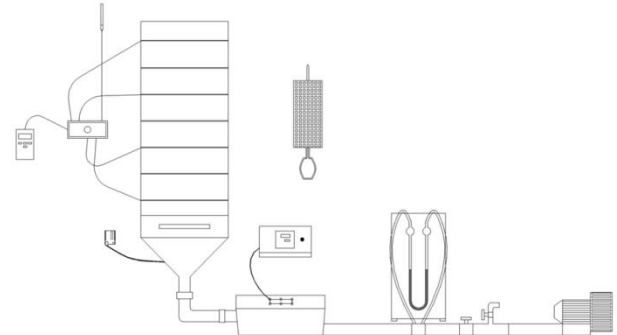


Figura 3: Linha do secador de bandejas desenvolvido.

Homogeneização do escoamento do ar

Abaixo da gaveta de chapa perfurada, foi instalada uma seção cônica para uniformização do escoamento de ar na entrada do secador. Além disso, foram utilizados diferentes recheios para compor um leito fixo entre a entrada de ar e a gaveta de chapa perfurada. Para verificar visualmente a homogeneidade da distribuição de ar no secador, foram usados bastões sinalizadores de fumaça colorida e uma câmera. Essa análise foi complementada medindo-se a distribuição de velocidades na última bandeja. Cada seção da bandeja foi dividida em três, totalizando nove regiões para medição. Estas foram realizadas com um anemômetro de fio quente, modelo AK833 da AKSO com resolução de 0,01 m/s para a faixa de velocidade utilizada.

Ensaio no secador de bandejas

Os ensaios foram conduzidos com a vazão máxima de ar fornecida pelo soprador, correspondendo a uma velocidade média de escoamento igual a 0,4 m/s na seção retangular do secador, e temperatura do ar de secagem igual a 60°C. A secagem foi realizada em quatro estágios, separados pela distância de 11,88 cm. Definiu-se que a massa de ramos de barbatimão in natura utilizada em cada estágio seria de 100 g. Com esses parâmetros, foram obtidas separadamente as cinéticas de secagem nos estágios de 1 a 4, simulando a operação em série. As curvas foram ajustadas a

equações empíricas e semi-empíricas da umidade adimensionalizada (Equação 1), tal como a proposta por Page (LIMA, 2013), apresentada na Equação 2.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2)$$

Com base nos ajustes das cinéticas de secagem aos modelos para cada estágio, foi possível estimar o tempo de residência necessário para o leito de folhas em cada estágio, bem como propor uma curva teórica da cinética de secagem para operação em série. Utilizando o tempo de residência obtido, a secagem foi conduzida até se atingir a umidade requerida pela Farmacopeia (2016), de 8 a 14% (b.u.).

Mistura e homogeneidade do produto seco

Em secadores de múltiplos estágios, é esperado que as sucessivas descargas por gravidade do produto, do estágio superior para os inferiores, contribuam para misturar o material, reduzindo a formação de gradientes de umidade. Para avaliar a qualidade da mistura no secador de bandejas, foram realizados ensaios com traçador. Para isso, uma amostra de 100 g de ramos de barbatimão foi dividida em três partes, sendo duas delas pintadas com tintas spray de cores distintas. Os ramos referentes a cada cor foram posicionados acima de cada seção da bandeja, conforme a Figura 4. A uniformidade da distribuição do material em cada estágio após as descargas foi avaliada por meio de fotos.

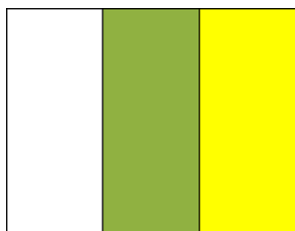


Figura 4: Demonstração da separação de ramos de barbatimão por cores na bandeja do quarto estágio.

Para avaliar a homogeneidade da secagem no secador operando como bateladas em série com as condições especificadas, a

umidade final do produto foi analisada por regiões na última bandeja de secagem, ou seja, no primeiro estágio. A bandeja foi dividida em seis regiões, conforme a Figura 5, para realização dessa análise. A umidade final em cada região foi obtida a partir de uma estufa a 105°C e uma balança semi-analítica Ohaus AR3130 de precisão 0,001g conectada a um estabilizador de corrente EVS Line da TS Shara.

4	5	6
1	2	3

FRENTE DO SECADOR

Figura 5: Vista superior das regiões da bandeja do primeiro estágio analisadas quanto à umidade final do produto.

Eficiência energética de secagem

Menshutina *et al.* (2004) definiram a eficiência instantânea de secagem como a energia requerida para evaporação em um dado instante de tempo em relação à diferença da energia na entrada e saída do gás nesse mesmo instante, apresentada na Equação 3. A sua integração em um determinado intervalo de tempo de secagem fornece a eficiência energética cumulativa de secagem, indicada na Equação 4. Esta foi calculada para as operações de secagem de ramos de barbatimão operando com um e com quatro estágios.

$$\varepsilon_D = \frac{R_w \cdot L_w}{G_a [C_{H^e} \cdot (T_e - T_a) - C_{H^s} \cdot (T_e - T_s)]} \quad (3)$$

$$E_D = \frac{1}{t} \int_0^t \varepsilon_D(t) dt \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização do material

Os galhos de barbatimão coletados na UFSCar foram cortados em ramos, como indicado na Figura 6.

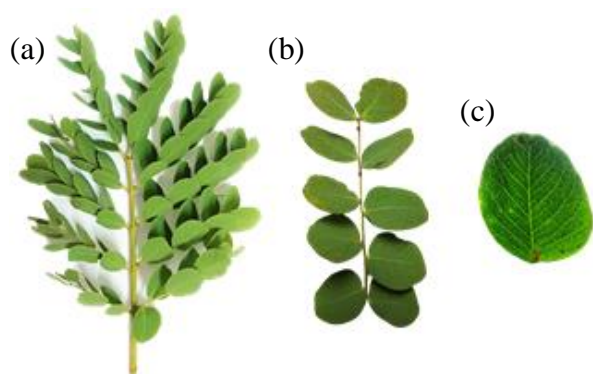


Figura 6: Barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) in natura: (a) galho, (b) ramo e (c) folha.

A umidade obtida dos ramos de barbatimão, secos em estufa a vácuo (-660 mmHg) durante 7 dias a 60°C, foi de $48,2 \pm 0,7$ % (b.u.). As frações mássicas de hastes e de folhas foram iguais a $13,6 \pm 0,4$ e $86,4 \pm 0,4$ %, respectivamente. A fração mássica das folhas nos ramos é consideravelmente superior à das hastes, sendo, portanto, o leito formado majoritariamente por folhas.

Secagem em camada espessa

Conforme a Figura 1, a camada 1 estava diretamente em contato com o ar de secagem na entrada do secador, enquanto a camada 4 estava no topo e também em contato com o ambiente. A umidade de cada camada de 100 g de ramos ao final das secagens de 10, 20 e 30 minutos está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Umidade de cada camada de 100 g de ramos de barbatimão ao final das secagens de 10, 20 e 30 minutos.

T (min)	X (b.u.) (%)			
	Camadas			
	1	2	3	4
10	$41,9 \pm 0,7$	$48,7 \pm 0,8$	$50,9 \pm 0,8$	$51,7 \pm 0,1$
20	$33,1 \pm 1,3$	$42,2 \pm 1,2$	$43,9 \pm 1,5$	$48,8 \pm 1,2$
30	$25,1 \pm 0,0$	$37,0 \pm 1,5$	$43,1 \pm 1,3$	$43,9 \pm 0,1$

Houve uma grande diferença entre as umidades de camadas distintas, evidenciando a formação de gradientes de umidade significativos ao longo da altura do leito. A menor umidade encontrada foi referente à camada 1, que tem contato direto com ar de secagem na entrada do secador, onde apresenta maior temperatura e menor umidade. À medida que o ar escoava através do leito e recebe umidade das folhas, sua temperatura diminuiu, assim como a força motriz para a transferência de calor e massa. Depois de 30 minutos de secagem, a camada 1 teve sua umidade reduzida para cerca de 25% (b.u.), enquanto as camadas 3 e 4 permaneceram com umidade acima de 40% (b.u.). A configuração de secagem em camada espessa por si só favorece o desenvolvimento de gradientes de umidade. No caso do leito formado por folhas, esse efeito tende a se agravar, pelo fato do leito ser muito heterogêneo, devido às características morfológicas das folhas. As diferenças de umidade atingiram valores de até 18,8% (b.u.), caracterizando, portanto, uma secagem extremamente heterogênea que não atende os padrões de qualidade estabelecidos.

A utilização de camada espessa para secagem de ramos de barbatimão não é aconselhada devido à heterogeneidade do produto obtido, sendo justificado testar configurações que promovam a secagem de forma homogênea.

Desenvolvimento do secador de bandejas

O secador de bandejas desenvolvido pode ser operado em regime de bateladas em série, com a inserção de uma nova carga no estágio 4 assim que for removida o material seco no estágio 1. Dessa forma, tenta-se aproximar ao máximo o processo de uma operação contínua. Há sete fendas posicionadas verticalmente, permitindo a variação da quantidade de bandejas em operação simultânea, bem como a alteração da distância entre os estágios. Isso é interessante do ponto de vista de flexibilidade operacional, permitindo aplicações futuras do secador para outros materiais.

Na Figura 7, o secador está configurado para operação com quatro estágios simultaneamente, utilizando a distância mínima entre as bandejas (11,88 cm), sendo

que a distância entre as bandejas limita a espessura da camada de folhas e carga do material, devido ao mecanismo para a descarga das bandejas de estágios acima.



Figura 7: Linha do secador de bandejas com 4 estágios operando simultaneamente.

Cada estágio em operação contém uma bandeja, que, por sua vez, é dividida em três seções, conforme a Figura 8. A divisão foi uma estratégia para melhorar a distribuição do material quando ele é descarregado para o estágio abaixo, evitando acúmulo em uma determinada região.

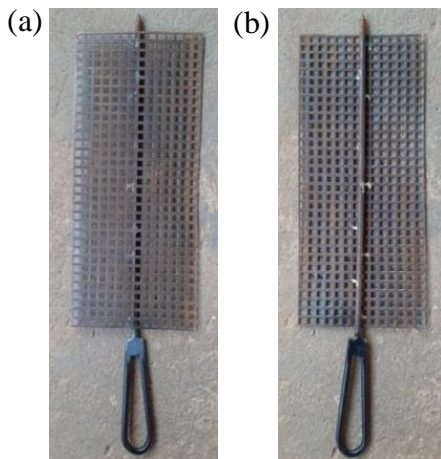


Figura 8: Seção da bandeja: (a) vista frontal e (b) posterior.

O encaixe da bandeja no secador é feito com o auxílio do cabo de sustentação localizado na parte posterior de cada seção, (Figura 8 (b)). Toda a seção da bandeja é inserida por uma das fendas horizontais do

secador e encaixada em pequenos furos localizados na parede posterior do mesmo, indicados na Figura 9 (a). Os três furos ao fundo do secador permitem o encaixe das bandejas e consequente variação de posição dos estágios. Abaixo do furo central de cada estágio em operação foi posicionado um termopar para medição da temperatura de entrada do ar de secagem.



Figura 9: Parede posterior do secador: (a) furos de inserção do cabo de sustentação das seções da bandeja e (b) parafusos de proteção e termopar para leitura da temperatura do ar.

A descarga de material para o estágio abaixo é feita girando-se cada seção no sentido desejado. Não é necessário que a rotação seja de 90° , pois em ângulos menores o material, de baixa massa específica, já é totalmente despejado. Foram instalados dois parafusos ao lado do termopar de cada estágio, conforme a Figura 9 (b), de modo a impedir que a seção central da bandeja entre em contato com o termopar durante esse processo, o que poderia conduzir a leituras incorretas de temperatura do ar. Tanto os termopares quanto os parafusos de proteção podem ser removidos durante os experimentos de cinética de secagem e os furos de inserção são vedados durante a operação.

A Figura 10 (a) ilustra as seções posicionadas para formar a bandeja de cada estágio, permitindo o depósito do material para secagem. Já a rotação das mesmas, provocando o despejo de material para estágios inferiores, é mostrada na Figura 10 (b).

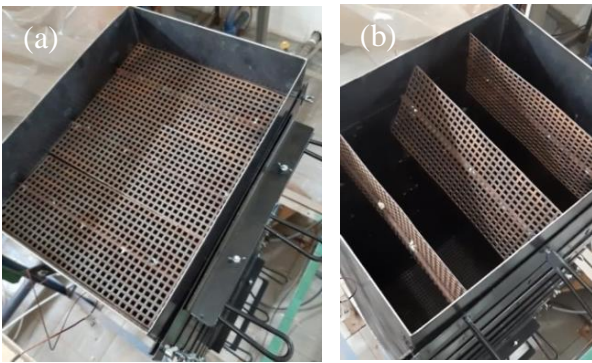


Figura 10: Seções da bandeja: (a) formando um estágio para secagem e (b) movimentação das seções para despejo de material no estágio abaixo.

As seções da bandeja, se encaixadas nas fendas de forma livre, tendem a se equilibrar em ângulo de 90° . Então, para viabilizar o depósito de material para a secagem, elas são presas em posição horizontal por um fixador (Figura 11 (c)). Para evitar o escape da vazão de ar ao ambiente pelas fendas de inserção das seções da bandeja, foram construídas vedações para cada fenda, conforme a Figura 11 (b). Se a fenda estiver em uso, utiliza-se a vedação com os espaços para encaixe dos cabos de sustentação das seções, caso contrário, utiliza-se a vedação contínua. Dessa forma, o escoamento se mantém uniforme por todo o secador.



Figura 11: (a) Seções da bandeja fixadas e abertura vedada: (b) vedações para estágios com ou sem bandejas e (c) fixador de bandeja.

Homogeneização do escoamento do ar

Os testes preliminares indicaram que o aumento gradual de área na seção de entrada localizada logo abaixo da gaveta perfurada não proporcionava uma distribuição uniforme do escoamento pois devido à alta vazão de ar utilizada, o escoamento era canalizado para a

região central. Dessa forma, foi necessário avaliar alternativas que melhorassem a distribuição de ar, a fim de promover uma secagem uniforme por toda bandeja.

A alternativa adotada foi a utilização de um sistema de distribuição constituído por um leito fixo na seção de alimentação localizada entre a gaveta de coleta de material e a entrada de ar na base do secador. Para que o recheio não entrasse na tubulação, uma tela metálica foi fixada alguns centímetros acima da entrada de ar no secador. O recheio escolhido era composto por uma camada de bolas de gude de diâmetro de 1,7 cm, contendo cerca de 728 g, e o restante por anéis de Raschig de $\frac{1}{2}$ pol. Também foi instalada uma placa defletora de chapa metálica quadrada de 4 pol de aresta logo acima da tela metálica.

Com o auxílio de um sinalizador de fumaça colorida, foi possível observar as linhas de corrente de escoamento de ar na região da gaveta perfurada. Verificou-se, assim que, de fato, o escoamento era homogeneamente distribuído por toda bandeja, vide Figura 12.

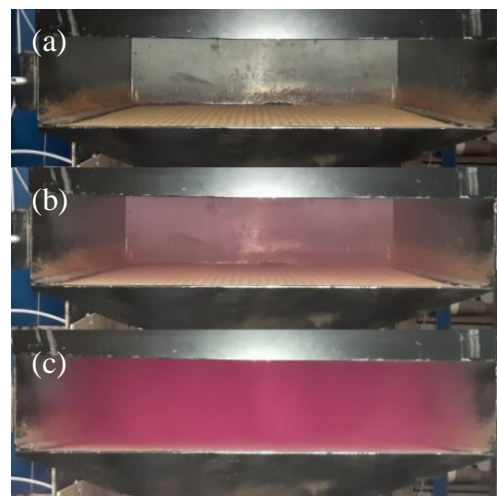


Figura 12. Experimento com traçador de fumaça colorida, visão frontal: (a) em $t=0$, (b) ao início do escoamento e (c) condição de escoamento pleno atingido.

Foi também realizada a medição da velocidade do ar em diferentes posições da gaveta. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 2 e confirma a distribuição homogênea de ar por toda bandeja, apresentando velocidade média igual a $0,52 \pm 0,13$ m/s.

Tabela 2: Velocidade do ar medida em diferentes posições da gaveta perfurada.

Posição	v (m/s)
1	0,49 ± 0,10
2	0,49 ± 0,10
3	0,50 ± 0,15
4	0,52 ± 0,16
5	0,57 ± 0,05
6	0,47 ± 0,17
7	0,43 ± 0,14
8	0,55 ± 0,17
9	0,52 ± 0,09
Média	0,52 ± 0,13

Ensaio de mistura no secador de bandejas

O resultado de um ensaio típico é mostrado na Figura 13, na qual é possível notar que a mistura foi parcial e, apesar da divisão da bandeja em três seções, o material ficou concentrado na região central, formando espaços vazios que favorecem a canalização do escoamento, especialmente nas regiões próximas às paredes do secador.

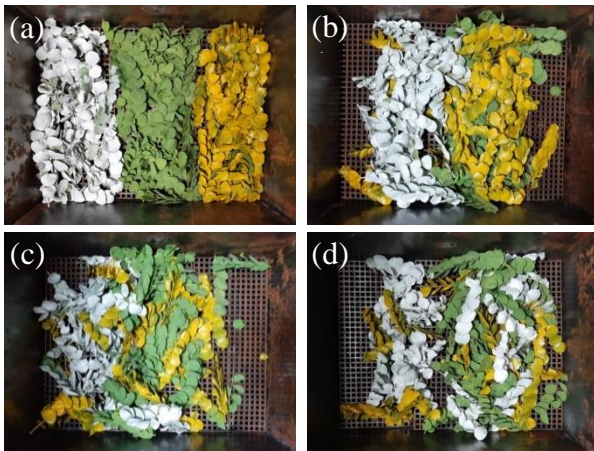


Figura 13: Distribuição de material descarregado: do (a) quarto estágio para o (b) terceiro, do terceiro para o (c) segundo e deste para o (d) primeiro.

Sendo assim, a fim de promover uma melhor distribuição dos ramos de barbatimão no secador, foram realizados, manualmente, movimentos vibratórios em todas as seções da bandeja após o despejo de material do estágio acima. Esse processo pode ser automatizado posteriormente. Essa prática trouxe resultados satisfatórios para todos os estágios, pois a área vazia na bandeja diminuiu consideravelmente, conforme mostrado na Figura 14.

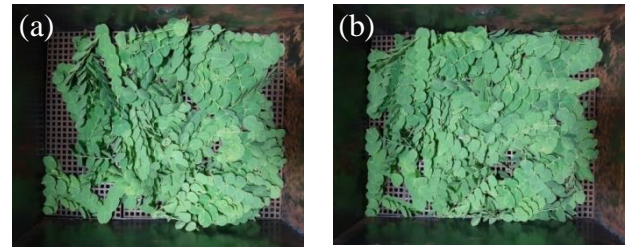


Figura 14: Distribuição dos ramos de barbatimão no despejo do terceiro estágio para o segundo ((a) sem vibração e (b) com vibração).

Ensaio no secador de bandejas

Cinéticas de secagem individuais: A configuração do secador de bandejas desenvolvido não permite acompanhar a redução de umidade do material em todos os estágios simultaneamente pela impossibilidade de se efetuar amostragens ao mesmo tempo em cada bandeja. Visando aproximar as condições experimentais da situação real, foi adotada uma metodologia alternativa. Foram obtidas as curvas de secagem completas para cada estágio separadamente, tentando reproduzir, dentro do possível, as condições do processo de bateladas em série. Assim, as curvas de secagem individuais de cada estágio foram utilizadas para se estimar o tempo de residência no secador operando com quatro estágios, uma vez que todos devem operar de maneira sincronizada, não havendo mistura de materiais entre eles. Os dados foram usados para se obter uma curva teórica de secagem que simule a variação de umidade de uma amostra de material deslocando-se por todos os estágios.

Os ensaios foram conduzidos na ordem crescente dos estágios, sendo que a partir do segundo estágio manteve-se nas bandejas inferiores uma determinada massa de material parcialmente seco, calculada de forma a simular de maneira aproximada as condições de operação “contínua”. A massa e umidade de ramos a serem usados nas bandejas inferiores foram estimadas a partir das curvas de secagem individuais. Primeiramente, determinou-se qual seria a umidade do material a ser inserido no estágio abaixo, a partir da análise das curvas de secagem individuais. Com esse valor, foi possível estimar qual seria aproximadamente o tempo de secagem necessário para atingir essa umidade, utilizando-se as curvas de secagem, e

a massa de material nesse instante de tempo, considerando que a massa inicial em cada estágio era de 100 g de ramos *in natura*.

A secagem no primeiro estágio foi iniciada com um leito de folhas cuja espessura era aproximadamente 6 cm. Já para a obtenção da curva de secagem no segundo estágio, foram inseridos no primeiro estágio aproximadamente 48 g de ramos de barbatimão previamente secos até a umidade de equilíbrio (110 minutos de secagem), já que esse estágio, por ser o último a receber o material, deverá operar com folhas cuja umidade é próxima à umidade final. Nos experimentos para obtenção da curva no terceiro estágio, foram inseridos no segundo estágio cerca de 49,5 g de ramos de barbatimão (correspondente ao material seco até a metade do tempo de secagem total, cerca de 105 minutos), além do material nas condições definidas para o primeiro estágio. Por fim, para a obtenção da curva no quarto estágio, utilizaram-se aproximadamente 52 g de ramos de barbatimão secos até um quarto do tempo total de secagem no terceiro estágio (90 minutos), além das quantidades indicadas para a primeira e segunda bandeja. As curvas de secagem dos ramos de barbatimão nos quatro estágios estão apresentadas na Figura 15.

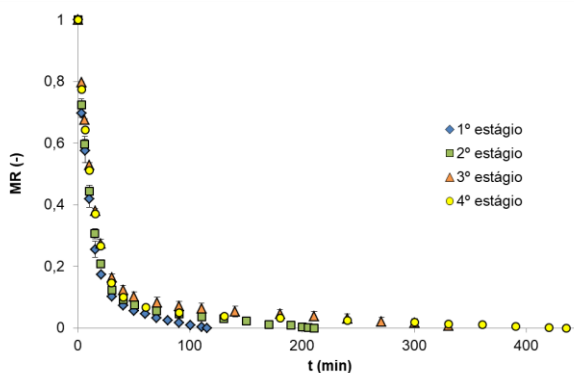


Figura 15: Curva de secagem individual de cada estágio do secador de bandejas a 0,4 m/s e 60°C: MR em função do tempo.

Houve uma diferença significativa apenas em relação ao tempo de secagem total dos ramos de barbatimão para os diferentes estágios, aumentando em função do acréscimo destes, uma vez que, com o aumento de leitos de secagem, há perda de calor e ganho de umidade pelo ar em ascensão. Portanto, a força

motriz é menor para os estágios superiores. Contudo, foi observado que, para esta operação, a queda de temperatura entre os estágios não foi significativa e, portanto, a temperatura permaneceu próxima a 60°C.

Estimativa da cinética de secagem como bateladas em série: O modelo de Page foi o que melhor se adequou às curvas de cinética de secagem individuais de ramos de barbatimão no secador de bandejas, apresentando $R^2=1$. Os parâmetros ajustados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do modelo de Page ajustado às curvas de cinética de secagem individuais de ramos de barbatimão no secador de bandejas.

	Estágios			
	1	2	3	4
k	$1,37 \cdot 10^{-1}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$
n	$8,11 \cdot 10^{-1}$	$7,48 \cdot 10^{-1}$	$7,61 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$

Assim, a equação de Page e os parâmetros obtidos na Tabela 3 foram utilizados para prever a cinética de secagem para cada estágio. Ademais, estabeleceu-se que a umidade desejada ao final da secagem seria de 10% (b.u.), conforme indicado pela Farmacopeia (2016) e, portanto, ao final da secagem de 100 g de material deveria restar 5,752 g de água na amostra, além de 51,8 g de material seco. Considerando a umidade inicial dos ramos de barbatimão, igual a 48,2% (b.u.), a umidade adimensionalizada seria 0,119 ao final da secagem.

As curvas de cinética de secagem conforme o modelo de Page foram traçadas até a umidade adimensionalizada de interesse, sendo adotado o valor de 9,5 minutos para o tempo de residência (τ_b) da amostra em cada estágio. Esse valor foi obtido considerando-se a operação síncrona dos quatro estágios e, em posse das cinéticas de secagem para cada um deles, calculou-se a umidade final de cada leito até obter uma curva de cinética de secagem utilizando um determinado tempo de residência que se adequasse ao valor final de umidade adimensionalizada pretendida. Essa variação da umidade em função do tempo estimada para a secagem de 100 g de material na operação com 4 estágios está apresentada na Figura 16.

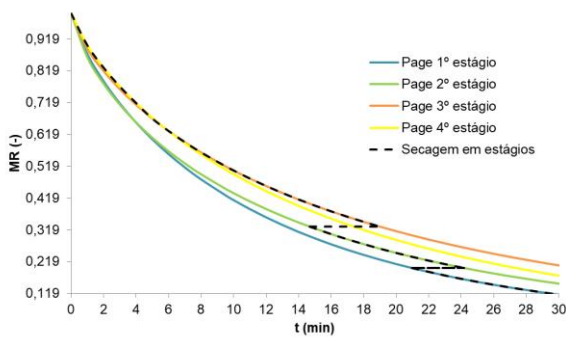


Figura 16: Curvas de cinética de secagem individuais pelo modelo de Page para diferentes estágios no secador de bandejas e variação de MR estimada na operação como bateladas em série.

A linha tracejada na Figura 16 representa a variação de umidade estimada durante a operação como bateladas em série com quatro estágios, com tempo de residência igual a 9,5 minutos. O processamento completo de uma amostra ocorre em cerca de 38 minutos, que corresponde à somatória dos tempos que a amostra permanece em cada estágio. Como a curva para o terceiro estágio é muito similar à curva do quarto, optou-se por utilizá-la para garantir que a secagem não fosse subdimensionada, o que poderia resultar em um produto que não atende às normas da Farmacopeia (2016).

Além de reduzir o tempo de secagem, a operação em estágios permite o melhor aproveitamento da energia do ar de secagem. A umidade não ligada, presente em maior quantidade no material *in natura*, é removida no estágio superior, enquanto a umidade mais fortemente ligada (que resta no final da secagem) é retirada em contato com o ar de entrada, que se encontra a maior temperatura e menor umidade relativa. Dessa forma, obtém-se um maior aproveitamento da energia do ar, que seria perdida para a atmosfera em temperaturas mais altas caso a operação ocorresse em só um estágio. Além disso, a literatura sugere que os constituintes bioativos são mais bem preservados quando expostos por menos tempo a temperaturas mais altas.

Cinética de secagem como bateladas em série: A secagem de ramos de barbatimão a 60°C e 0,4 m/s foi realizada no secador de bandejas operando como bateladas em série. Para isso, a operação iniciou pelo quarto estágio e, a cada 9,5 minutos, houve a

descarga de material para o estágio abaixo. Dessa forma, foi possível obter a umidade do material desde a entrada até a saída do secador. Os valores obtidos experimentalmente foram próximos da curva estimada, sendo que a curva teórica subestima a umidade no início do experimento, conforme a Figura 17.

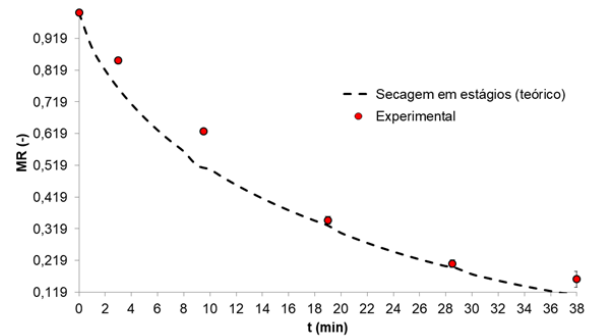


Figura 17: Curva de secagem de 100 g de ramos de barbatimão obtida na operação em 4 estágios a 60°C, $\tau_b = 9,5$ min e operando como bateladas em série: experimental em comparação à estimada.

Uma das possíveis justificativas é a própria limitação intrínseca ao processo de obtenção da umidade na operação “contínua”: o despejo de material deve ser sincronizado, de modo que, ao atingir o tempo de residência, todas as bandejas deveriam receber material da bandeja superior. Porém, o processo manual é demorado, fazendo com que os pontos obtidos no início da secagem, ou seja, nos últimos estágios, sejam mais prejudicados pela quantidade maior de bandejas operando simultaneamente. Os três primeiros pontos experimentais são referentes ao quarto estágio e, por conta disso, são os mais afetados durante a operação manual de obtenção da cinética de secagem. Além disso, deve-se destacar que a própria curva teórica da secagem foi obtida a partir da simulação da operação individual em cada estágio, em um procedimento que envolveu aproximações. A umidade final obtida foi de $9,6 \pm 0,8\%$ (b.u.), indicando que a secagem atingiu o objetivo inicial de obter material com umidade de 10% (b.u.).

Homogeneidade do produto seco

Para avaliar a umidade de descarga e a homogeneidade do produto seco, foi

conduzida a secagem de ramos de barbatimão em quatro estágios operando como bateladas em série pelo tempo de 9,5 minutos por estágio, simulando uma operação contínua. As amostras foram coletadas por regiões no primeiro estágio, de acordo com as posições indicadas na Figura 5. Os valores obtidos estão apresentados na Figura 18. A umidade média no final da secagem foi inferior a 10% (b.u.) em todas as regiões, estando de acordo com a especificação. Os valores de umidade final obtidos para diferentes regiões da bandeja não apresentaram diferença significativa entre si ao considerar os desvios padrões e, portanto, a secagem gerou um produto homogêneo quanto à umidade, como desejado.

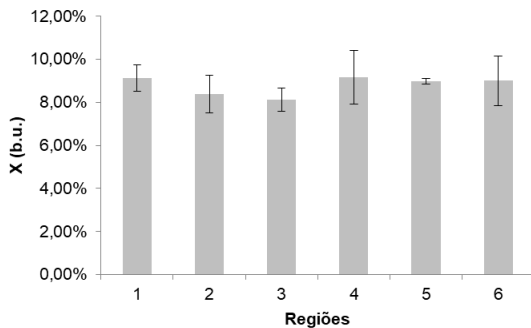


Figura 18: Umidade (b.u.) de ramos de barbatimão em diferentes regiões da bandeja após a secagem em 4 estágios a 60°C, $\tau_b = 9,5$ min e operando como bateladas em série.

Eficiência energética de secagem

Para a análise comparativa das eficiências de secagem em um único estágio e no secador de bandejas de quatro estágios, o tempo de operação foi fixado em 38 minutos e a carga de material em 100 g de ramos de barbatimão *in natura*, sendo as taxas de secagem calculadas com as curvas para a operação completa no primeiro estágio e como bateladas em série nos quatro estágios.

Foram medidas as temperaturas do ar de exaustão nas operações de secagem com um e com quatro estágios. Essa temperatura varia com o tempo, sendo menor no início do processo, momento em que o leito ainda está sendo aquecido e mais umidade é retirada. Ao final da operação, esse valor estabiliza. Para a operação em um estágio, o valor médio da temperatura do ar de exaustão foi de $57,7 \pm 0,8$ °C, enquanto que para quatro estágios foi de $50,2 \pm 2,9$ °C.

Dessa forma, foram calculados valores de eficiência instantânea de secagem (ϵ_D) para um e quatro estágios. Os dados indicaram um decaimento exponencial e foram ajustados a funções exponenciais. Foi obtido um ajuste satisfatório ($R^2 > 0,955$) e, portanto, as curvas obtidas foram integradas para o cálculo da eficiência energética cumulativa de secagem (E_D). Os valores obtidos de eficiência energética de secagem foram 3,16 e 3,98% para a operação em 1 e 4 estágios, respectivamente.

O aumento de eficiência energética de secagem devido à operação em quatro estágios foi de 25,6%, indicando ganho no aproveitamento da energia fornecida, uma vez que o ar de secagem deixa o secador a uma temperatura consideravelmente menor na operação com diversas bandejas. Observa-se que a equação não considera as perdas de energia para o ambiente, que são maiores no secador multiestágios em comparação ao de estágio único. Nas duas situações, as eficiências são baixas devido ao curto tempo de residência do ar em contato com o leito. Uma vantagem adicional da operação multiestágios é o aumento da capacidade de processamento, que também não foi considerada nesse cálculo comparativo.

Além disso, o fato da temperatura do ar de secagem na saída ser alta mesmo na operação com quatro estágios é um indicativo de que é possível utilizar um número ainda maior de bandejas para essa secagem ou operar com maior carga de material, aumentando a espessura dos leitos em cada estágio, atentando-se para a homogeneidade do produto obtido.

CONCLUSÕES

A secagem de barbatimão em camada espessa resultou em um produto não uniforme devido à formação de gradientes de umidade significativos. Para viabilizar uma secagem uniforme na configuração de leito fixo, um secador multiestágios foi desenvolvido, construído e instrumentado. Ele se mostrou adequado para a secagem de ramos de barbatimão no modo de bateladas em série. Para os ramos de barbatimão, a mistura de material no secador de bandejas durante a

operação como bateladas em série foi parcial e o material ficou concentrado na região central, formando espaços vazios que favorecem a canalização do escoamento de ar. Esse problema foi mitigado com a vibração manual de todas as seções da bandeja após o despejo de material. A equação de Page descreveu adequadamente os dados experimentais de cinética de secagem, sendo que a partir dele foi possível estimar o tempo de residência de 9,5 minutos para cada estágio, totalizando 38 minutos para a secagem de 100 g de ramos de barbatimão até a umidade de 10% (b.u.). Os dados experimentais foram condizentes com a curva de secagem teórica da operação em série e o produto obtido apresentou umidade uniforme e menor que 10% (b.u.), atendendo às especificações para armazenagem. As eficiências energéticas cumulativas de secagem da operação em um e quatro estágios foram 3,16 e 3,98%, respectivamente, representando um aumento de 25,6% para a configuração adotada no secador de bandejas.

Por fim, conclui-se que o secador desenvolvido atendeu aos objetivos definidos, uma vez que viabilizou secagens homogêneas dos ramos de barbatimão.

NOMENCLATURA

C_H^e	Calor úmido do ar de entrada
C_H^s	Calor úmido do ar de saída
E_D	Eficiência energética cumulativa da secagem
G_a	Vazão de massa de ar
k	Parâmetro de ajuste do modelo de Page
L_w	Calor latente de vaporização da água
M_e	Massa de ramos no equilíbrio termodinâmico
M_o	Massa inicial de ramos
M_t	Massa de ramos no tempo t
MR	Umidade adimensionalizada
n	Parâmetro de ajuste do modelo de Page
R_w	Taxa de secagem
R^2	Coefficiente de determinação
t	Tempo de secagem
T_a	Ar a temperatura ambiente
T_e	Temperatura de entrada do ar
T_s	Temperatura de saída do ar
v	Velocidade do ar de secagem

V_f	Volume das folhas
$X_{(b.u.)}$	Umidade em base úmida
ϵ_D	Eficiência energética instantânea da secagem
T_b	Tempo de residência em cada estágio

REFERÊNCIAS

- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE (2016), Memento Fitoterápico: Farmacopeia Brasileira, Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), Brasília – DF.
- BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2002), Biodiversidade brasileira: avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade nos biomas brasileiros, MMA/SBF - Brasília.
- FERREIRA, É. C.; DA SILVA, J. L. L.; DE SOUZA, R. F. (2013), As Propriedades Mediciniais E Bioquímicas Da Planta *Stryphnodendron adstringens* “Barbatimão”, *Biológicas & Saúde*, v. 3, n. 11, p. 14–32.
- LIMA, R. de A. B (2013), Análise da secagem convectiva de folhas de manjerição (*Ocimum basilicum* L.), PPGEQ/UFCar – São Carlos - SP (tese de doutorado).
- MENSHUTINA, N. V.; GORDIENKO, M. G.; VOYNOVSKIY, A. A.; KUDRA, T (2004), Dynamic analysis of drying energy consumption. *Drying Technology*, v. 22, n. 10, p. 2281–2290.
- PRADO, M. M. (2004), Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem, PPGEQ/UFCar – São Carlos - SP (tese de doutorado).
- SABINO, A. P. L.; EUSTÁQUIO, L. M. S.; MIRANDA, A. C. F.; BIOJONE, C.; MARIOSA, T. N.; GOUVÊA, C. M. C. P. (2018), *Stryphnodendron adstringens* (“Barbatimão”) Leaf Fraction: Chemical Characterization, Antioxidant Activity, and Cytotoxicity Towards Human Breast Cancer Cell Lines. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 184, n. 4, p. 1375–1389.